کاربرد روش‌های لرزه‌ای در بررسی شرایط تشکیل و اثبات حضور هیدرات گازی در دریای عمان

بهنام حسینی شعار[۱]، عبدالرحیم جواهریان*[۲] و مجتبی صدیق عربانی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر(behnam5365@yahoo.com)
[۲] استاد مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (javaheri@ut.ac.ir)
[۳] کارشناسی ارشد ژئوفیزیک مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران (m.arabani@niocexp.ir)

(دریافت: ۸۷/۸/۹، پذیرش نهایی: ۸۷/۱۲/۱۲)

چکیده

در طول دو دهه اخیر هیدرات‌های گازی به‌واسطه دلایل متعددی به‌عنوان موضوع مورد توجه تحقیقات و بررسی‌های اقیانوسی بوده است که مهم‌ترین دلیل بررسی آنها پتانسیل تامین سوخت انرژی آینده جهان است. هیدرات‌های گازی بلورهای یخ‌مانندی هستند که در آنها مولکول‌های آب با پیوند هیدروژنی محفظه‌هایی برای محبوس کردن گازهای هیدروکربوری و غیرهیدروکربوری تشکیل داده است. روش‌های متعددی برای پی‌جویی هیدرات‌های گازی وجود دارد که در این میان، بررسی آنها با استفاده از روش‌های لرزه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. وجود شرایط ترمودینامیکی مناسب، حضور گاز و آب به میزان کافی و وجود مسیرهای مهاجرت گاز از اعماق به رسوب‌های سطحی برای تشکیل هیدرات‌های گازی ضروری است و در ارزیابی و پی‌جوئی‌های این منبع انرژی، بررسی این شرایط امری ضروری است. همچنین حضور هیدرات‌های گازی و گاز آزاد محبوس‌شده در زیر آن باعث ایجاد تغییر در خصوصیات کشسان رسوبات میزبان می‌شود و رد و نشان‌هایی را بر داده‌های لرزه‌ای باقی می‌گذارد که شناسایی و پی‌بردن به حضور آنها را با روش‌های لرزه‌ای ممکن ساخته است. از مهم‌ترین نشانه‌های لرزه‌ای هیدرات‌های گازی می‌توان به بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر، لکه تخت و لکه روشن اشاره کرد. بنابراین حضور هیدرات‌های گازی در داخل رسوبات میزبان با استفاده از نشانه‌های لرزه‌ای قابل شناسایی و نابه‌هنجاری‌های مرتبط با هیدرات‌های گازی و نشانه‌های آنها با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای قابل بررسی است. در این مقاله شرایط تشکیل و پایداری هیدرات‌های گازی در بخش ایرانی دریای عمان با استفاده از مقاطع لرزه‌ای دوبعدی مورد بررسی قرار گرفته است و حضور هیدرات‌های گازی نیز با استفاده از نشانه‌های لرزه‌ای مربوطه به اثبات رسیده و خصوصیات مربوط به آنها نیز با استفاده از نشانگرهای قدرت بازتاب و قطبیدگی ظاهری، مورد تایید قرارگرفته است. همچنین از نشانگر تجزیه طیفی نیز برای بررسی اثر میرایی هیدرات‌های گازی بر دامنه‌ی امواج لرزه‌ای استفاده شده است. این نشانگر نیز وجود زون حاوی هیدرات‌های گازی را به اثبات رسانده است و می‌توان به استفاده از این منبع انرژی در آینده امیدوار بود.

واژه‌های کلیدی: هیدرات‌های گازی، نشانه‌های لرزه‌ای، نشانگرهای لرزه‌ای، خصوصیات کشسان، دریای عمان

Application of seismic methods in study of appreciate growth condition and occurrence of gas hydrate in Oman Sea

Hosseini Shoar, B.[1], Javaherian, A. *[2], Sadiq-Arabani, M[3].

[1] MSc student of Faculty of Mining, Metallurgy, and Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology
[2] Professor of Institute of Geophysics, University of Tehran
[3] MSc in Geophysics, Exploration Directorate of National Iranian Oil Company

Abstract

During the past two decades, marine researches have focused on gas hydrates because of many reasons that the most important of them is future energy resource potential. Gas hydrates are ice-like crystals that form a rigid cage of water molecules and entrap hydrocarbon and non-hydrocarbon gas by hydrogen bonding. There are many methods for prospecting gas hydrates. Seismic methods are the most applicable

* نویسنده مسئول (Corresponding author)

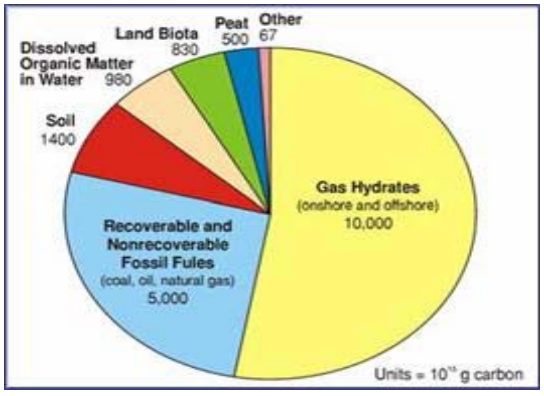
tools to study them. The presence of the suitable thermodynamic conditions, gas and water in appropriate amount and gas migration pathway from depth to sea floor sediment are necessary for growth and stability of gas hydrates and evaluation of these conditions are necessary for prospecting gas hydrates. The occurrence of gas hydrates and free gas in host sediments changes the elastic properties and makes them detectable with seismic methods. The important seismic indicators of gas hydrates are bottom simulating reflector, flat spot and bright spot. Therefore, the presence of the gas hydrates in host sediments are detectable with seismic indicators and the study of the gas hydrate anomalies are applicable with seismic attributes. In this article, the appropriate conditions for growth and stability of gas hydrates in Oman Sea were examined with 2D seismic sections, the occurrence of the gas hydrates in sediments was proven with seismic indicators and the properties of their indicators were studied with reflection strength and apparent polarity attributes. Also the effect of the gas hydrates in attenuation of seismic wave amplitude was studied with spectral decomposition attribute. The results of this study prove the presence of gas hydrates in Oman Sea.

Keyword: Gas hydrates, seismic indicators, seismic attributes, elastic properties, Oman Sea

۱ مقدمه

شیمی‌دانان در اوایل قرن نوزدهم به وجود ترکیبات هیدرات‌های گازی پی‌بردند (داوی، ۱۸۱۱). اهمیت یافتن هیدرات‌های گازی در صنعت نفت به دهه ۱۹۳۰ باز می‌گردد که تشکیل هیدرات‌های گازی باعث مسدود شدن خطوط انتقال گاز طبیعی در مناطق قطبی می‌شد و مشکلاتی برای این صنعت به‌وجود می‌آورد (همراشمیت، ۱۹۳۴). در دهه ۱۹۶۰ ترکیبات هیدرات‌های گازی در میدان گازی مسویاخا و در منطقه قطبی سیبری یافت شد (ماکوگن و همکاران، ۱۹۷۱). در دهه ۱۹۷۰ با پیشرفت تجهیزات ژئوفیزیکی علاوه بر مناطق قطبی در رسوبات نیز به‌وجود هیدرات‌های گازی طبیعی در رسوبات کم‌عمق بستر دریای عمیق پی برده شد (استول و همکاران، ۱۹۷۱). در اوایل دهه ۱۹۸۰، هیدرات‌های گازی طی عملیات حفاری دریای عمیق در قسمت مکزیکو، از رسوبات بستر دریا بازیافت شد (شیپلی و دیدیک، ۱۹۸۲) و از آن به بعد، بازیافت هیدرات‌های گازی طی حفاری‌های دریای عمیق از رسوبات قسمت‌های شیب قاره‌ای اقیانوس‌های آرام و اطلس نیز صورت گرفت (کِنولدن، ۱۹۹۳). از اواسط دهه‌ی ۱۹۹۰، محققان بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه‌های ژئوشیمی، ژئوفیزیک و فرایندهای میکروبیولوژی در مورد مخازن هیدرات‌های گازی موجود در اقیانوس‌ها و دریاهای عمیق آغاز کرده‌اند (ترهو و همکاران، ۲۰۰۶). در چند سال اخیر اکتشافات صورت‌گرفته نفتی روی مناطق عمیق‌تر دریایی (اعماق بیشتر از ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر) باعث توجه بیشتر به خطرات ناشی از هیدرات‌های گازی مانند رهاشدن گاز غیر قابل کنترل از رسوبات سطحی، ریزش بستر دریا و روان شدن رسوبات سطحی شده است. این درحالی‌است‌که قبل از دهه اخیر، تحقیق روی هیدرات‌های گازی در صنعت نفت صرفا به منظور بهبود بهره‌دهی و ایمنی صورت می‌پذیرفت (راپل، ۲۰۰۷).

هیدرات‌های گازی در حال حاضر درحکم یکی از منابع تامین سوخت جهان در قرن جاری در نظر گرفته می‌شود (مکس و همکاران، ۲۰۰۶). رسوباتی که در حد اقتصادی حاوی هیدرات‌های گازی هستند معادل میدان‌های گازی عظیم و فوق عظیم جهان گاز دارند و می‌توانند در نقش منبع غیرمتعارف گاز مورد استفاده قرار گیرند (راپل، ۲۰۰۷). حجم متان محبوس‌شده در ۱ متر مکعب هیدرات گازی معادل ۱۶۴ متر مکعب گاز متان در شرایط دما و فشار استاندارد خواهد بود (کِنولدن، ۱۹۹۸) و متان ذخیره‌شده در این ساختارها بیش از نیمی از کربن آلی موجود در جهان را به خود اختصاص داده است که این مقدار تقریبا دوبرابر مقدار کربن موجود در سوخت‌های فسیلی قابل بازیافت و غیرقابل بازیافت موجود در مخازن جهان است (کِنولدن، ۱۹۹۳) (شکل ۱).



شکل ۱. توزیع جهانی کربن آلی با واحد 10^{15} گرم کربن (کِنولدن، ۱۹۹۳).

در این مقاله، شرایط تشکیل و پایداری هیدرات‌های گازی در رسوبات بستر قسمت‌های عمیق دریای عمان مورد بررسی قرار گرفته و حضور هیدرات‌های گازی با استفاده از نشانه‌های لرزه‌ای بازتاب کننده‌ی شبیه‌ساز بستر (Bottom simulating reflector, BSR) ، لکه تخت (Flat spot) و لکه روشن (Bright spot) به اثبات رسیده است. از نشانگرهای لرزه‌ای قدرت بازتاب (Reflection strength) و قطبیدگی ظاهری (Apparent polarity) برای بررسی خصوصیات نشانه‌های لرزه‌ای هیدرات‌های گازی که در مقاطع لرزه‌ای دوبعدی قسمت ایرانی دریای عمان مشاهده شده، استفاده شده است. همچنین نشانگر تجزیه طیفی (Spectral decomposition) نیز در بررسی اثر افزایش میرایی (Attenuation) ناشی از هیدرات‌های گازی، مورد استفاده قرار گرفته است.

۲ ماهیت و اهمیت هیدرات‌های گازی

هیدرات‌های گازی شبکه جامد و بلوری از مولکول‌های آب‌اند که با پیوند هیدروژنی به یکدیگر متصل شده‌اند و مولکول‌های گازی با وزن مولکولی کم را در خود حبس کرده‌اند (اسلوان، ۱۹۹۸). نوع این گازها بستگی به ترکیب گازی محیط تشکیل دارد. متان با منشا ترموژنیک و بیوژنیک معمول‌ترین گازی است که در هیدرات‌های گازی ذخیره شده است و حدود ٪۹۹گازهای تشکیل دهنده هیدرات‌های گازی را تشکیل می‌دهد (کِنولدن، ۱۹۹۵). هیدرات‌های گازی تفاوت‌های بسیار زیادی با یخ دارند و برخلاف یخ تحت شرایط فشار زیاد، در دمای بالای صفر درجه سلسیوس نیز تشکیل می‌شوند.

پی بردن به شرایطی که هیدرات‌های گازی تحت آن تشکیل می‌شوند و پایدار می‌مانند، برای تعیین گستردگی این منبع انرژی ضروری است. هیدرات‌های گازی نسبت به شرایط محیط بسیار حساس‌اند و تغییر در فشار، دما، شوری آب، نوع و میزان اشباع گاز تشکیل دهنده هیدرات در داخل خلل و فرج رسوب، باعث رشد و ایجاد شرایط پایداری یا تلاشی هیدرات‌های گازی می‌شود. به‌طورکلی شرایط زیر برای تشکیل و پایداری هیدرات‌ها در رسوبات لازم است (مکس و همکاران، ۲۰۰۶):

۱- شرایط ترمودینامیکی مناسب که شامل درجه حرارت کم و فشار زیاد است.

۲- وجود مقدار کافی از گازهای هیدروکربوری با منشا ترموژنیک و یا بیوژنیک و یا غیر هیدروکربوری که باید با رسوبات زیری و یا باکتری‌ها مهیا باشد.

۳- گاز تولید شده در زیر زون پایدار هیدرات باید قادر به مهاجرت به منطقه هیدرات باشد.

٤- حضور آب برای تشکیل شبکه جامد یخی یک عامل ضروری است.

با توجه به شرایط ترمودینامیکی خاصی که برای تشکیل و پایداری هیدرات‌های گازی لازم است، این ترکیبات در دو منطقه زمین‌شناسی یافت می‌شوند:

۱- مناطق با عرض جغرافیایی بالا و در عمق کمتر از ۱ تا ۲ کیلومتر که دما پایین و یا بیشتر از صفر درجه سلسیوس است (راپل، ۲۰۰۷).

۲- در اعماق دریاها و دریاچه‌های عمیق و در رسوبات شیب قاره‌ای و قسمت‌های عمیق‌تر اقیانوس‌ها

که دارای دمای کم و فشار زیاداند (کومار وهمکاران، ۲۰۰۶).

هیدرات‌های گازی در محیط‌های دریایی دور از ساحل در زون پایدار هیدرات که لایه موازی با کف دریا است تشکیل می‌شوند (شکل ۲). با زیاد شدن عمق آب، دما کاهش پیدا می‌کند و در عمق خاصی، انحنای منحنی دما افزایش می‌یابد (راپل، ۲۰۰۷). با افزایش عمق آب، دما کاهش و فشار افزایش پیدا می‌کند و شرایط دمایی و فشاری مناسب‌تر می‌شود که در نتیجه، گستره زون پایدار هیدرات گازی وسیع‌تر می‌شود و ضخامت رسوبات حاوی هیدرات‌های گازی افزایش می‌یابد (مکس و همکاران، ۲۰۰۶). بنابراین ضخامت زون حاوی هیدرات‌های گازی در منطقه شیب قاره‌ای کمتر از ضخامت زون حاوی هیدرات‌های گازی در قسمت عمیق دریا است (بدلی، ۱۹۸۵). براساس شرایط دما و فشار برای پایداری هیدرات گازی، ضخامت رسوبات حاوی هیدرات‌های گازی در قسمت‌های عمیق دریا به ۸۰۰ و حتی ۱۰۰۰ متر نیز می‌رسد و با کاهش یافتن عمق آب، این ضخامت کاهش می‌یابد و در نهایت قسمت پایین زون پایدار هیدرات‌های گازی روی بستر دریا منطبق می‌شود و دیگر اثری از رسوبات حاوی هیدرات‌های گازی دیده نمی‌شود (راپل، ۲۰۰۷). با افزایش غلظت هیدرات‌های گازی در داخل خلل و فرج رسوب، تراوایی آن کاهش می‌یابد و در زیر زون پایدار هیدرات‌های گازی، خلل و فرج رسوبات با آب شور که دارای گاز محلول است و یا با خود گاز اشباع شده است و زون حاوی هیدرات‌های گازی خصوصیات پوش‌سنگ را بدست می‌آورد و باعث به‌دام‌افتادن گاز آزاد می‌شود (کنولدن، ۱۹۹۸). بنابراین علاوه بر گاز محبوس شده در ساختارهای هیدرات‌گازی، می‌توان به بهره‌برداری از گاز آزاد به دام افتاده در زیر رسوبات حاوی هیدرات گازی امیدوار بود.

در حال حاضر، هیدرات‌های گازی به‌خاطر دارا بودن پتانسیل‌های متعدد، مورد توجه محققان و مجامع علمی قرار گرفته است. موارد اهمیت هیدرات‌های گازی را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

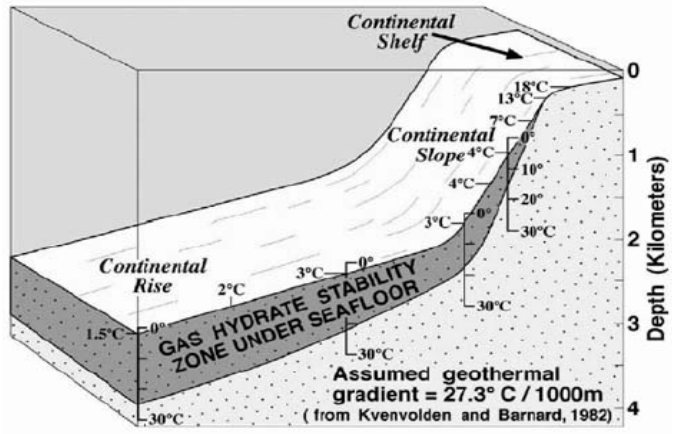
۱- هیدرات‌های گازی درحکم تامین‌کننده سوخت جهان در سال‌های آینده (مکس و همکاران، ۲۰۰۶).

۲- مسدودکردن خطوط انتقال گاز و چاه‌ها (راپل، ۲۰۰۷).

۳- خطرات حفاری (هارداج و همکاران، ۲۰۰۶).

٤- ناپایداری بستر دریا (کِنولدن، ۱۹۹۸).

۵- اثر گلخانه‌ای گاز موجود در ساختار هیدرات و افزایش دمای کره زمین (راپل، ۲۰۰۷).



شکل ۲. زون پایدار هیدرات گازی در زیر بستر اقیانوس با درنظرگرفتن گرادیان زمین‌گرمایی ۳ر۲۷ درجه سلسیوس در هر ۱۰۰۰ متر (مکس و همکاران، ۲۰۰٦).

۳ روش‌های شناسایی و بررسی هیدرات‌های گازی

اولین مرحله در تحقیقات مربوط به هیدرات‌های گازی در یک منطقه، بررسی شرایط تشکیل و پایداری آن است. همچنین هیدرات‌های گازی در یک منطقه با رد و نشان‌های باقی‌مانده از آن روی مقاطع لرزه‌ای، قابل شناسایی خواهد بود و با استفاده از آنها می‌توان به حضور هیدرات‌های گازی پی برد. حضور هیدرات‌های گازی در داخل رسوبات و گاز آزاد موجود در زیر آن خصوصیات لرزه‌ای رسوب میزبان را تحت تاثیر قرار می‌دهد و شناسایی آنها را با روش‌های لرزه‌ای ممکن می‌سازد (یوان و همکاران، ۱۹۹۹). برای مثال، حضور هیدرات‌های گازی در داخل رسوبات باعث افزایش سرعت و میزان میرایی امواج لرزه‌ای در رسوبات میزبان می‌شود (کوردون و همکاران، ۲۰۰۶).

از مهم‌ترین نشانه‌هایی‌که در بررسی وجود هیدرات‌های گازی در یک منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌توان به بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر (مکس و همکاران، ۲۰۰۶)، لکه تخت (اکر، ۱۹۹۷) و لکه روشن (مکس و همکاران، ۲۰۰۶) اشاره کرد. نشانگرهای لرزه‌ای نیز در پی‌جویی‌ها و در شناسایی بی‌هنجاری‌های مرتبط با هیدرات‌های گازی و گازهای آزاد که به سادگی روی مقاطع لرزه‌ای قابل شناسایی نیستند و همچنین بررسی خصوصیات نشانه‌های لرزه‌ای نقش مهمی را ایفا می‌کند.

۴ هیدرات‌های گازی در دریای عمان

در بخش ایرانی دریای عمان تاکنون کار منتشرشده‌ای در زمینه هیدرات‌های گازی صورت نپذیرفته است. اما در قسمت‌های شیب قاره‌ای پاکستان (گِرومِیر و همکاران، ۲۰۰۰) و همچنین شمال غربی اقیانوس هند (وایت، ۱۹۷۹) حضور هیدرات‌های گازی با استفاده از مقاطع لرزه‌ای به اثبات رسیده است.

در این مقاله، در مرحله اول شرایط تشکیل و پایداری هیدرات‌های گازی در قسمت ایرانی دریای عمان با بررسی شرایط ترمودینامیکی رسوبات بستر دریا، وجود گاز آزاد در منطقه عمان و وجود مسیرهای مهاجرت برای حرکت گاز از قسمت‌های عمیق به رسوبات سطحی‌تر با استفاده از مقاطع لرزه‌ای دوبعدی ارزیابی شده و امکان تشکیل و حضور هیدرات‌های گازی مورد تائید قرار گرفته است. در مرحله دوم، پی‌جویی هیدرات‌های گازی با استفاده از نشانه‌های لرزه‌ای بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر، لکه تخت و لکه روشن موجود در مقاطع لرزه‌ای دوبعدی قسمت ایرانی دریای عمان صورت پذیرفته است. همچنین از نشانگرهای قطبیدگی ظاهری و قدرت بازتاب برای بررسی خصوصیات نشانه‌های لرزه‌ای و از نشانگر تجزیه طیفی برای بررسی بی‌هنجاری میرایی ناشی از حضور هیدرات‌های گازی استفاده شده است. حال به امکان تشکیل و حضور هیدرات‌های گازی در دریای عمان می‌پردازیم.

۴-۱ امکان‌سنجی

عوامل محیطی موثر در تشکیل و پایداری هیدرات‌های گازی را می‌توان در عواملی همچون شرایط ترمودینامیکی مناسب (دمای کم و فشار زیاد)، وجود مواد تشکیل‌دهنده هیدرات (مانند آب و گاز) و وجود مجرای مناسب برای مهاجرت گاز از قسمت‌های عمیق به زون پایداری هیدرات‌های گازی خلاصه کرد (مکس و همکاران، ۲۰۰۶) که مرحله اول این مقاله به بررسی این شرایط در دریای عمان اختصاص پیدا کرده است.

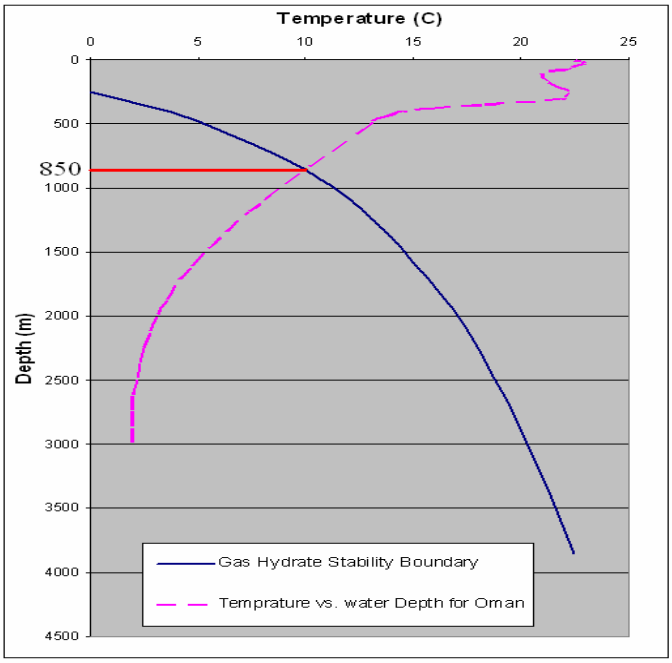
۴-۱-۱ شرایط ترمودینامیکی

بسته به عرض جغرافیایی منطقه مورد نظر، شرایط ترمودینامیکی در دریای عمیق از عمق خاصی به بعد برای تشکیل و پایداری هیدرات‌های گازی در داخل

رسوبات بستر دریا مناسب است. این عمق مورد نظر را محل تقاطع نمودار تغییرات دما برحسب عمق آب با نمودار مرز فازی پایداری هیدرات‌های گازی در نظر می‌گیرند (راپل، ۲۰۰۷). در قسمت‌های بسیار عمیق بخش ایرانی دریای عمان، عمق آب به ۳۳۰۰ متر نیز می‌رسد. در شکل ۳ تغییرات دما برحسب عمق برای دریای عمان (وُهات و همکاران، ۲۰۰۳) و همچنین نمودار مرز فازی پایداری هیدرات‌های گازی (مکس و همکاران، ۲۰۰۶) نشان داده شده است که محل تقاطع آنها در عمق ۸۵۰ متری است و از این عمق به بعد رسوبات بستر دریای عمان شرایط تشکیل و پایداری هیدرات‌های گازی را از لحاظ ترمودینامیکی دارا هستند.

۴-۱-۲ وجود مواد تشکیل‌دهنده هیدرات

وجود آب و گاز تشکیل دهنده هیدرات به میزان کافی برای تشکیل و پایداری هیدرات‌های گازی امری ضروری است. در رسوبات ناپیوسته بستر دریا، آب به میزان کافی وجود دارد. گازهای هیدروکربوری به خصوص متان، در رسوبات حاشیه قاره‌ها به وفور یافت می‌شود. ورود کربن آلی به داخل رسوبات بستر دریا و همچنین رسوب‌گذاری سریع در این مکان‌ها از اکسید شدن این مواد جلوگیری می‌کند، مواد آلی موجود در رسوبات حفظ می‌شوند و به مصرف باکتری‌های موجود در رسوب می‌رسند و متان درحکم محصول جانبی فرایند تخمیر تولید می‌شود. در زون‌های برخوردی (مانند دریای عمان) منشورهای رسوبی ضخیم و گرادیان زمین‌گرمایی کاهش می‌یابد و امکان تولید متان بیوژنیک را تا عمق بیشتری فراهم می‌آورد (هیندمن و همکاران، ۲۰۰۵). حضور گاز آزاد در دریای عمان با استفاده از نشانه‌های گوناگونی همچون گازهای همراه گِل‌فشان‌ها و دودکش گازی، مورد بررسی قرارگرفته است. نشانه‌ها بر این امر دلالت دارند که این منطقه



شکل ۳. تعیین مرز بالای پایداری هیدرات گازی با نمودار تغییرات دما برحسب عمق آب در بخش ایرانی دریای عمان و نمودار مرز فازی پایداری هیدرات گازی که محل تقاطع این دو نمودار معرف حداقل عمق آب است که شرایط تشکیل و پایداری هیدرات‌های گازی از لحاظ ترمودینامیکی در آن فراهم هستند.

پتانسیل تولید گاز را دارد و گاز آزاد در این منطقه موجود است. در مقاطع لرزه‌ای دریای عمان و همچنین ساحل ایرانی مکران، گل‌فشان‌های فراوانی دیده می‌شود. گازهای همراه این گل‌فشان‌ها را می‌توان به‌منزله دلیل اصلی اکتشاف‌های هیدروکربوری در مجموعه فزاینده مکران درنظر گرفت. همچنین به واسطه فرار گاز از تجمعات گازی و مهاجرت آن به داخل لایه‌های بالایی، زون‌هایی با غلظت گازی کم به‌وجود می‌آید که در آن کیفیت داده کاهش پیدا کرده است (بدلی، ۱۹۸۵) و بازتاب‌کننده‌ها پیوستگی کمتری پیدا می‌کنند (چوپرا و مارفورت، ۲۰۰۷). در دریای عمان نمونه‌هایی از دودکش‌های گازی در مقاطع لرزه‌ای مشاهده شده است که از آن می‌توان در حکم نشانه‌ای برای حضور گاز آزاد در منطقه یاد کرد (حسینی شعار، ۱۳۸۷).

۴-۱-۳ وجود مجاری مناسب برای مهاجرت گاز

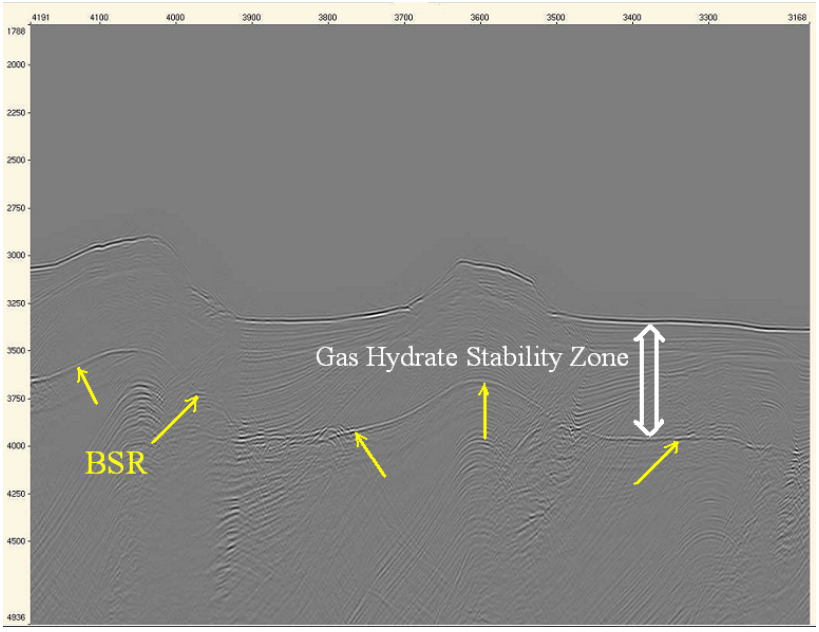
در پیشانی مجموعه فزاینده مکران، وجود گسل‌های رانده در منشور رسوبی بسیار ضخیم به‌مثابهٔ مسیری برای مهاجرت گازهای دارای منشا بیوژنیک و به‌خصوص گازهای دارای منشا ترموژنیک تولید شده در اعماق زیاد به رسوبات سطحی درنظرگرفته می‌شود و این مجاری امکان حضور این گازها را در ترکیب هیدرات‌های گازی فراهم می‌کنند.

۴-۲ اثبات حضور هیدرات‌های گازی در دریای عمان

هیدرات‌های گازی و گاز آزاد محبوس‌شده در زیر آن با استفاده از نشانه‌های لرزه‌ای موجود در مقاطع لرزه‌ای قابل پی‌جویی است (کومار و همکاران، ۲۰۰۶). همچنین نشانگرهای لرزه‌ای نیز در پی‌جویی‌ها و در شناسایی بی‌هنجاری‌های مرتبط با حضور هیدرات‌های گازی و گاز آزاد که به سادگی روی مقاطع لرزه‌ای قابل شناسایی نیستند و بررسی خصوصیات نشانه‌های لرزه‌ای، نقش مهمی را ایفا می‌کند. در مرحله دوم در این مقاله پی‌جویی هیدرات‌های گازی با استفاده از نشانه‌ها و نشانگرهای لرزه‌ای صورت پذیرفته است و حضور هیدرات گازی و گاز آزاد محبوس شده در زیر آن به اثبات رسیده است.

۴-۲-۱ بازتاب کننده شبیه‌ساز بستر

اولین نشانه وجود هیدرات‌های گازی در مقاطع لرزه‌ای مربوط به مناطق دریایی، بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر است. این بازتاب‌کننده به واسطه اختلاف مقاومت صوتی بین زون حاوی هیدرات گازی و زون حاوی گاز آزاد که در زیر آن قرار دارد به وجود می‌آید و نشانگر مرز پایین زون پایدار هیدرات گازی است. در رسوبات حاوی هیدرات گازی سرعت امواج لرزه‌ای افزایش و چگالی اندکی کاهش می‌یابد و مقدار مقاومت صوتی در زون حاوی هیدرات‌های گازی افزایش پیدا می‌کند. حضور گاز آزاد حتی به میزان اندک در زیر زون حاوی هیدرات‌های گازی باعث کاهش سرعت و چگالی رسوب می‌شود و بدین ترتیب مقاومت صوتی این رسوبات را کاهش می‌دهد. تفاوت نسبتا زیاد مقدار مقاومت صوتی بین مرز پایداری هیدرات گازی و گاز آزاد باعث به‌وجود آمدن این بازتاب‌کننده می‌شود. حضور هیدرات‌های گازی در محیط‌های دریای عمیق و اقیانوس‌ها با پی‌گیری بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر که به اختصار BSR نامیده می‌شود، صورت می‌پذیرد. وجود این نشانه روی مقاطع لرزه‌ای حاکی از حضور هیدرات‌های گازی در منطقه است ولی نبود آن حاکی از نبود هیدرات گازی در منطقه نیست و باید تحقیقات کامل‌تری در این راستا صورت پذیرد. در شکل ۴ نمونه‌ای از این بازتاب‌کننده در مقطع لرزه‌ای مربوط به قسمت ایرانی دریای عمان نشان داده شده است. این بازتاب‌کننده دارای خصوصیات زیر است که به شناسایی آن در مقاطع لرزه‌ای کمک می‌کند.



شکل ٤. مقطع لرزه‌ای مهاجرت‌داده‌شده مربوط به قسمت ایرانی دریای عمان که در آن بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر به همراه زون پایدار هیدرات گازی نشان داده شده است. در این مقطع BSR با پیکان‌ها نشان داده شده است. همان‌طورکه در این مقطع مشاهده می‌شود BSR که درحکم مرز پایین پایداری هیدرات گازی درنظرگرفته می‌شود، از شکل بستر دریا تبعیت می‌کند و خصوصیات یک بازتاب‌کننده قطع‌کننده را دارد.

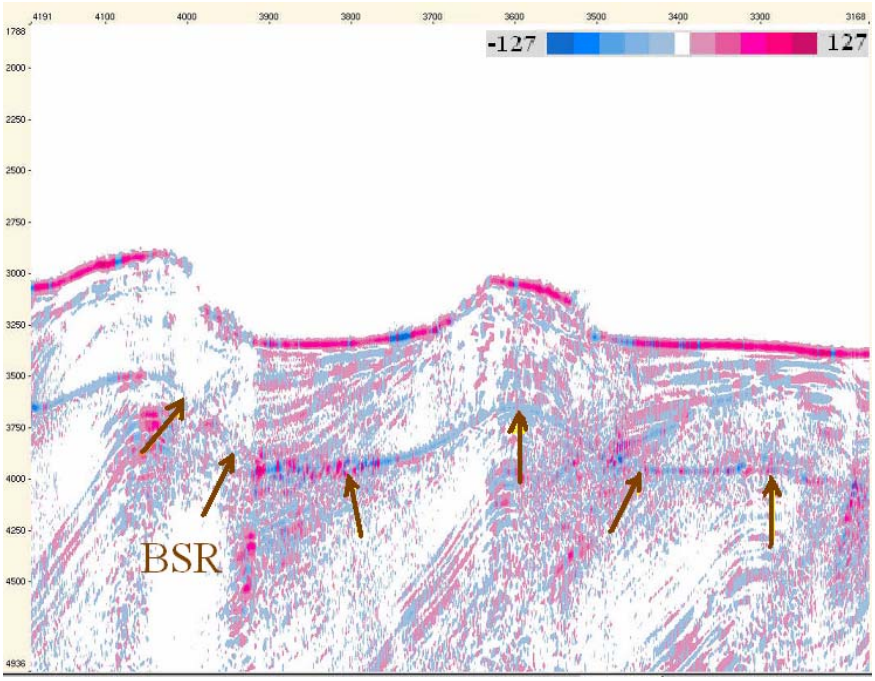
۱- شرایط مناسب دما و فشار برای پایداری هیدرات‌های گازی در دریا به صورتی است که بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر تقریبا از شکل بستر دریا تبعیت می‌کند (رابرت و همکاران، ۱۹۹۹).

۲- با توجه به اینکه اختلاف مقاومت صوتی در این بازتاب‌کننده منفی است، دارای قطبیدگی معکوس نسبت به بازتاب کننده بستر دریا است (راجپوت و همکاران، ۲۰۰۵).

۳- این بازتاب‌کننده معمولا بازتاب‌کننده‌ای قوی است و دارای دامنه بزرگی است (مکس و همکاران، ۲۰۰۶).

٤- با توجه به اینکه این بازتاب‌کننده از مرز فازی پایداری هیدرات‌های گازی تبعیت می‌کند و تقریبا با بازتاب‌کننده بستر دریا موازی است، در مواردی که بازتاب‌کننده‌های چینه‌ای و ساختمانی با بستر دریا موازی نباشند آنها را قطع می‌کند و خصوصیات بازتاب‌کننده قطع‌کننده را به خود می‌گیرد (دای و همکاران، ۲۰۰۴).

اختلاف مقاومت صوتی به‌وجود آمده بین زون حاوی گاز آزاد زیری و زون هیدرات‌های گازی منفی است، بنابراین بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر که بیانگر مرز این دو محیط است دارای قطبیدگی معکوس نسبت به بازتاب‌کننده بستر دریا است. نشانگر قطبیدگی ظاهری کاربرد گسترده‌ای در شناسایی تغییرات جانبی قطبیدگی یک بازتاب‌کننده دارد و برای تعیین قطبیدگی یک بازتاب‌کننده به کار می‌رود. با اعمال این نشانگر روی مقاطع لرزه‌ای دریای عمان که در آن BSR مشاهده شده است معکوس بودن قطبیدگی این بازتاب‌کننده نسبت به بازتاب‌کننده بستر دریا مشخص می‌شود (شکل ۵). این نشانگر در تحقیقات مربوط به هیدرات‌های گازی و تفکیک BSR مربوط به حضور هیدرات و BSR مربوط به فرایندهای دیاژنز (برای مثال تبدیل اوپال-A به اوپال-CT) سودمند است. زیرا BSR مربوط به فرایندهای دیاژنز دارای قطبیدگی یکسان با بازتاب‌کننده بستر دریا است و اختلاف مقاومت صوتی به‌وجود آمده در آن مثبت است.



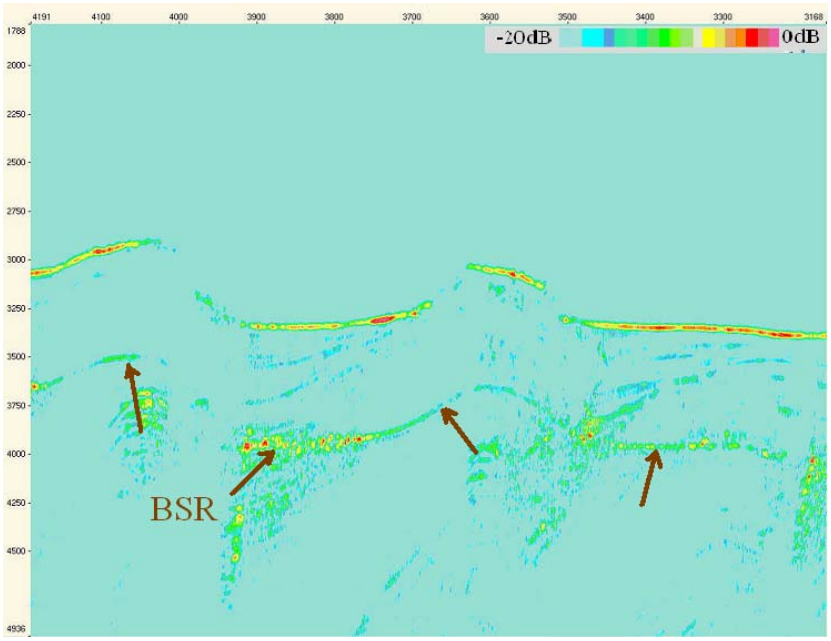
شکل ۵. کاربرد نشانگر قطبیدگی ظاهری در شناسایی BSR مربوط به هیدرات‌های گازی در مقطع لرزه‌ای شکل ٤. در این مقطع رنگ آبی بیانگر قطبیدگی منفی و رنگ سرخ بیانگر قطبیت مثبت است. همان‌طورکه در این شکل مشاهده می‌شود BSR دارای قطبیدگی معکوس نسبت به بازتاب‌کننده بستر دریا است.

چون رسوبات حاوی هیدرات‌های گازی سرعت زیادی دارند و رسوبات قرار گرفته در زیر آن به‌واسطه حضور گاز آزاد دچار کاهش سرعت شده‌اند، اختلاف مقاومت صوتی در مرز دو لایه زیاد است و BSR به صورت بازتاب‌کننده قوی و دارای دامنه نسبتا بزرگی نمایان می‌شود. دراین راستا از نشانگر قدرت بازتاب استفاده شده است که کاربرد گسترده‌ای در شناسایی تغییرات جانبی ضریب بازتاب و دامنه یک بازتاب‌کننده که ممکن است به واسطه تغییرات سیال، تغییرات سنگ‌شناختی و تغییرات چینه‌شناسی به‌وجود آمده باشد، دارد. با اعمال این نشانگر و به واسطه کاهش قدرت تفکیک قائم در مقاطع لرزه‌ای که در آن BSR مشاهده شده است، این بازتاب‌کننده به‌صورت واضح‌تری نمایان می‌شود (شکل ۶). همچنین با اعمال این نشانگر مناطقی که دارای غلظت‌های زیادی از هیدرات‌های گازی و گاز آزاداند به واسطه افزایش اختلاف مقاومت صوتی در BSR قابل شناسایی خواهند بود.

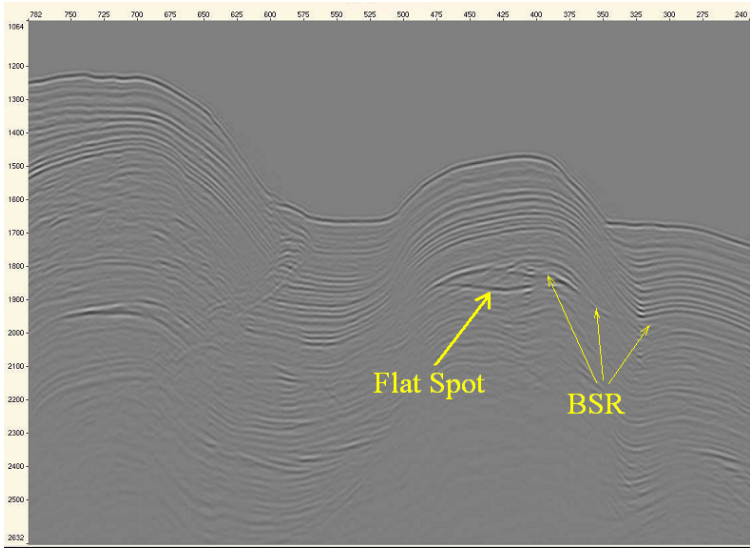
۴-۲-۲ لکه تخت و لکه روشن

در صورتی که مرز پایین زون پایداری هیدرات گازی به تبعیت از بستر دریا تولید بستگی کرده باشد و ساختار مناسب برای تجمعات گاز فراهم شده باشد، نشانه‌های تجمع گاز آزاد همچون لکه تخت نمایان می‌شود. این بازتاب‌کننده مربوط به سطح بین رسوبات حاوی گاز آزاد و رسوبات زیری آن است که یک بازتاب‌کننده تقریبا افقی با قطبیدگی مثبت تولید می‌کند. در مقاطع لرزه‌ای منطقه مورد بررسی و در محدوده رسوبات حاوی هیدرات‌های گازی، لکه تخت مرتبط با تجمع گاز در زیر زون هیدرات‌های گازی مشاهده شده است. برای مثال این بازتاب‌کننده مسطح در مقطع شکل ۷ که مربوط به دریای عمان است در زمان بازتاب ۱۸۵۰ میلی‌ثانیه و در زیر بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر به‌وجود آمده است. در این مقطع لرزه‌ای که مقطعی زمانی است،

مشاهده می‌شود که بازتاب‌کننده سطح بین رسوبات حاوی گاز و آب یک سطح کاملا تخت نیست و در آن پایین‌افتادگی بازتاب‌کننده در اثر پدیده سرعتی مشاهده می‌شود. این امر به واسطه کاهش سرعت امواج لرزه‌ای به واسطه حضور گاز اتفاق می‌افتد و از آن می‌توان به‌منزلهٔ نشانه‌ای دیگر از تجمع گاز آزاد یاد کرد. در این مقطع بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر به‌صورت بازتاب‌کننده‌ای قطع‌کننده عمل می‌کند و همین خصوصیت، امکان شناسایی و تفکیک آن را از دیگر بازتاب‌کننده‌ها در مقاطع لرزه‌ای فراهم آورده است.



شکل ٦. کاربرد نشانگر قدرت بازتاب در شناسایی بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر در مقطع لرزه‌ای شکل ٤. در این شکل بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر با پیکان‌ها نشان داده شده است. BSR که بازتاب‌کننده‌ای نسبتا قوی است با به کارگیری نشانگر قدرت بازتاب نمایان‌تر می‌شود.

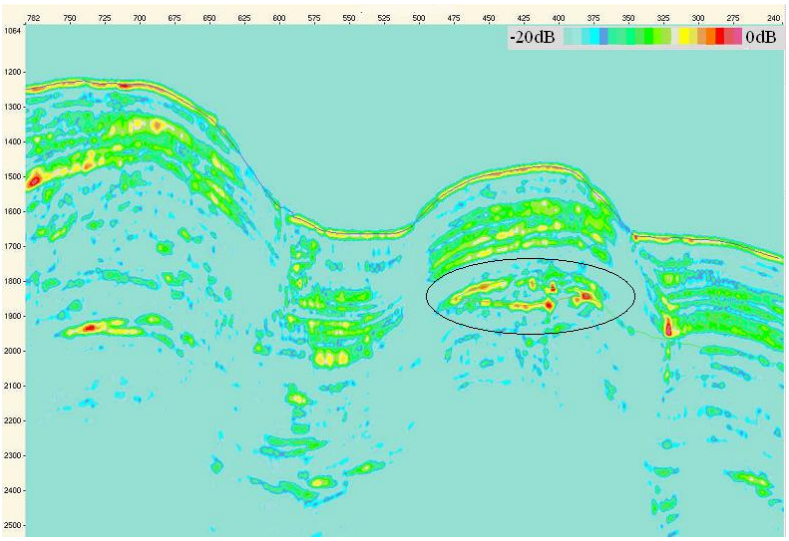


شکل ۷. لکه تخت در مقطع لرزه‌ای مربوط به قسمت ایرانی دریای عمان که درحکم نشانه‌ای برای تجمع گاز در زیر رسوبات حاوی هیدرات گازی مورد توجه قرار می‌گیرد. همان‌طورکه در این مقطع مشاهده می‌شود در بازتاب‌کننده تخت پایین اُفتادگی سرعتی دیده می‌شود که می‌تواند به‌منزلهٔ نشانه دیگری از حضور گاز در نظر گرفته شود.

لازم به ذکر است که لکه روشن یا همان افزایش جانبی میزان دامنه بازتاب در مقطع لرزه‌ای شکل ۷ مشاهده می‌شود که این افزایش دامنه به واسطه حضور گاز در زیر BSR صورت پذیرفته است. برای بررسی آن از نشانگر قدرت بازتاب استفاده شده است و این نشانگر نیز این مسئله را تایید می‌کند که میزان دامنه بازتاب در زیر بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر که گاز تجمع‌یافته افزایش پیدا کرده است (شکل ۸). این افزایش در میزان دامنه BSR هم به دلیل حضور گاز آزاد و هم به دلیل بالا رفتن غلظت هیدرات‌های گازی در این قسمت رُخ خواهد داد.

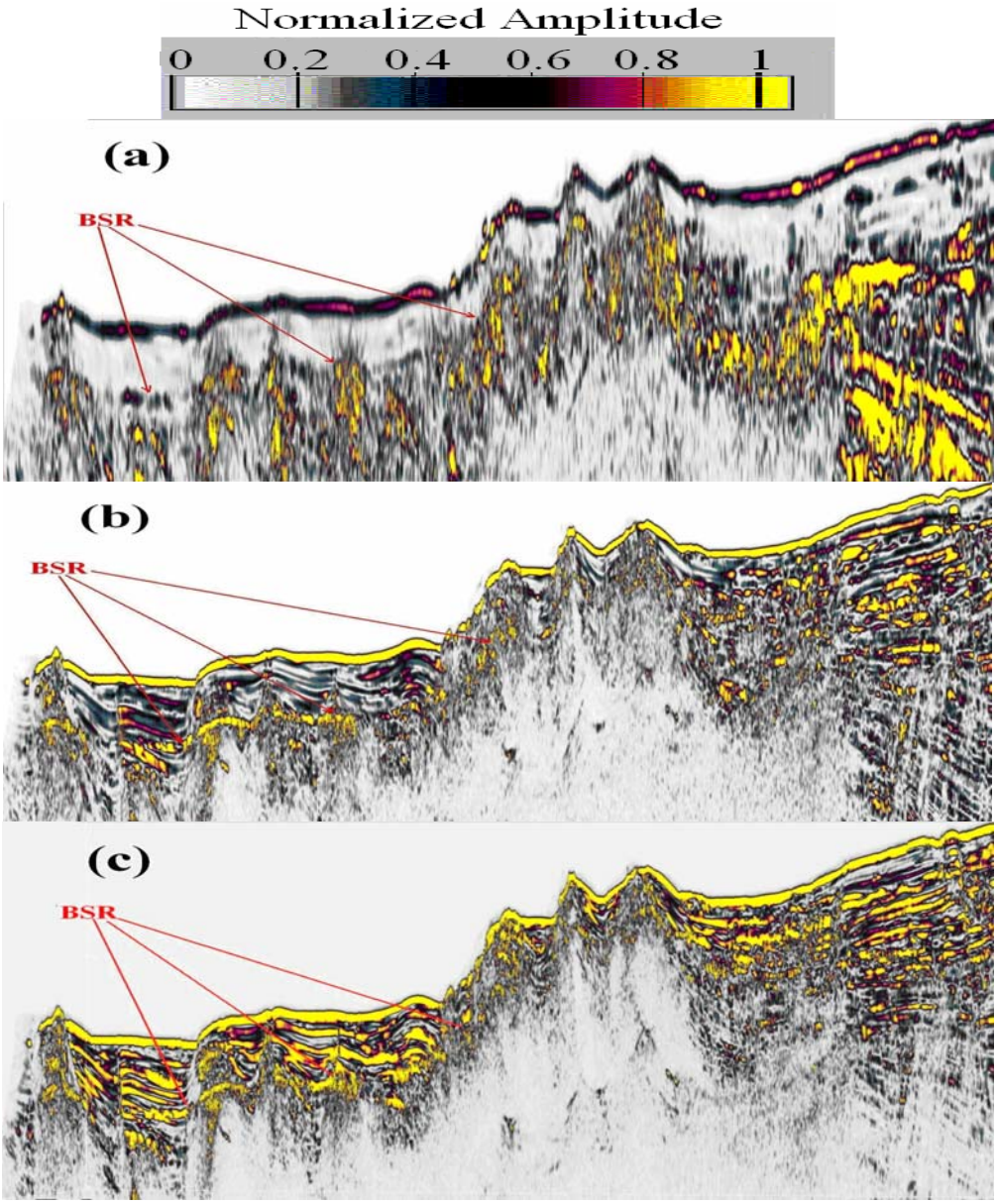
۴-۲-۳ نشانگر تجزیه طیفی

حضور هیدرات‌های گازی در داخل رسوبات، میزبان میرایی امواج لرزه‌ای را افزایش می‌دهد و این امر درحکم خصوصیتی ذاتی برای هیدرات‌های گازی در نظر گرفته شده است. بنابراین، میزان میرایی امواج لرزه‌ای می‌تواند درحکم یک نشانگر برای حضور هیدرات‌های گازی مورد استفاده قرار گیرد. تاثیر میرایی و جذب محیطی امواج لرزه‌ای در بسامدهای زیاد بیشتر از بسامدهای کم است و دامنه سیگنال‌هایی با بسامد زیاد میرایی بیشتری را متحمل می‌شوند (بدلی، ۱۹۸۵). برای بررسی این مسئله از نشانگر تجزیه طیفی و روش تبدیل موجک پیوسته استفاده شده است. این نشانگر لرزه‌ای قابلیت نمایان ساختن اطلاعات نهفته مربوط به بی‌هنجاری‌های میرایی هیدرات‌های گازی را در داده‌های لرزه‌ای دریای عمان فراهم کرده و خصوصیات مورد توجه آن را که به سادگی قابل شناسایی نبود بهبود بخشیده و نمایان‌تر ساخته است. شکل ۹ نتایج به‌دست آمده از اعمال نشانگر تجزیه طیفی روی مقطع لرزه‌ای مربوط به دریای عمان که نشانه‌های هیدرات گازی در آن مشاهده می‌شود نشان داده شده است. با استفاده از این نشانگر لرزه‌ای مقطع لرزه‌ای، به طیف‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ هرتز تجزیه شده و به ترتیب در شکل‌های ۹-a، ۹-b و ۹-c نشان داده شده است. برای مثال مقطع حاصل از اعمال نشانگر تجزیه طیفی با بسامد ۳۰ هرتز دامنه سیگنال‌های ۳۰ هرتز را نمایان می‌سازد. همان‌طورکه در این شکل مشاهده می‌شود در مقطع بسامد ۱۰ هرتز به



شکل ۸. کاربرد نشانگر قدرت بازتاب در شناسایی لکه روشن مشاهده‌شده در مقطع لرزه‌ای شکل ۷ که افزایش دامنه در آن به واسطه تجمع گاز در زیر BSR و همچنین غلظت زیاد هیدرات گازی در آن قسمت به‌وجود آمده است. در این شکل تجمع گاز و به‌وجود آمدن نشانه لکه روشن در داخل بیضی نشان داده شده است. همان‌طورکه در این شکل نیز مشاهده می‌شود، لکه تخت نیز بازتاب‌کننده‌ای نسبتا قوی است.

واسطه کاهش‌یافتن قدرت تفکیک قائم، بازتاب‌کننده‌های چینه‌ای مشخص نیست ولی BSR خود را نمایان کرده است. همچنین به‌واسطه کم بودن اثر میرایی بر سیگنال‌هایی با بسامد کم، دامنه بازتاب‌کننده‌های قرار گرفته در زیر BSR همچنان رویت می‌شوند. در مقطع بسامد ۳۰ هرتز و خصوصا ۵۰ هرتز بازتاب کننده‌های چینه‌ای قرار گرفته در زون پایداری هیدرات‌های گازی به واسطه بهبود قدرت تفکیک قائم نمایان شده‌اند. در این دو مقطع مشاهده می‌شود که در زیر سطح BSR دامنه سیگنال‌های لرزه‌ای با بسامد نسبتا زیاد تقریبا از بین رفته‌اند که این امر در مقطع مربوط به بسامد ۵۰ هرتز مشهودتر از مقطع مربوط به بسامد ۳۰ هرتز است که علت آن به واسطه تاثیر بیشتر میرایی بر دامنه سیگنال‌هایی با بسامد بالا است.



شکل ۹. کاربرد نشانگر تجزیه طیفی در شناسایی بی‌هنجاری‌های میرایی مرتبط با هیدرات‌های گازی در مقطع لرزه‌ای مربوط به دریای عمان: در شکل (a) دامنه‌ی بسامد ۱۰هرتز، (b) دامنه‌ی بسامد ۳۰ هرتز و (c) دامنه‌ی بسامد ۵۰ هرتز نشان داده شده است. با مقایسه دامنه‌ی بسامدهای ۱۰، ۳۰ و ۵۰ هرتز مشخص می‌شود که میرایی مرتبط با هیدرات‌های گازی بر دامنه بسامدهای زیاد بیشتر اثر کرده است.

۵ نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌ها و ارزیابی‌های صورت‌گرفته در این تحقیق، نتایج زیر درخصوص بررسی شرایط تشکیل و پایداری هیدرات‌های گازی و همچنین پی‌جویی و شناسایی اینگونه ساختارها باتوجه به نشانه‌ها و نشانگرهای لرزه‌ای در قسمت ایرانی دریای عمان به‌دست آمده است.

۱- تحقیقات و بررسی‌های صورت‌گرفته در مورد تشکیل و پایداری هیدرات‌های گازی در دریای عمان حاکی از آن است که سه شرط اساسی برای تشکیل و پایداری هیدرات‌های گازی در منطقه وجود دارد. شرط اول که وجود شرایط ترمودینامیکی مناسب برای پایداری هیدرات گازی است در رسوبات بستر دریا که عمق آب در آنها بیشتر از ۸۵۰ متر باشد فراهم است. همچنین گازهای همراه گل‌فشان‌ها و همچنین وجود دودکش‌های گازی حاکی از پتانسیل تولید گاز و حضور گاز آزاد در منطقه است. وجود گسل‌های رانده موجود در پیشانی مجموعه فزاینده مکران نیز درحکم مجاری اصلی حرکت گاز از اعماق به رسوبات سطحی که دارای شرایط مناسب برای تشکیل هیدرات گازی هستند در نظر گرفته می‌شود.

۲- بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر که به‌منزلهٔ مهمترین نشانه موجود در مقاطع لرزه‌ای برای پی‌جویی هیدرات‌های گازی موجود در رسوبات اقیانوسی شناخته می‌شود، در مقاطع لرزه‌ای دریای عمان و در اعماق آب بیشتر از ۱۱۵۰ متر مشاهده شده است و نشانگرهای لرزه‌ای قطبیدگی ظاهری و قدرت بازتاب نیز خصوصیات آن را مورد تایید قرار داده است. این بازتاب‌کننده به‌صورت تقریبا موازی نسبت به بستر دریا و در عمق ۴۰۰ تا ۶۵۰ متری در زیر آن واقع شده است. براساس این نشانه لرزه‌ای، حدود ۲۷۰۰۰ کیلومتر مربع از بخش ایرانی دریای عمان درحکم محدوده رسوبات حاوی هیدرات‌های گازی در نظر گرفته شده است.

۳- لکه تخت و لکه روشن که درحکم نشانه‌هایی از حضور گاز در تجمعات گازی در نظر گرفته می‌شوند در مقاطع لرزه‌ای دریای عمان و در زیر بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر مشاهده شده‌اند.

٤- نشانگر تجزیه طیفی نیز بی‌هنجاری‌های مرتبط با میرایی ناشی از هیدرات‌های گازی را در مقاطع لرزه‌ای دریای عمان مورد تایید قرار داده است و این امر نیز بر وجود هیدرات‌های گازی در دریای عمان دلالت دارد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از مدیریت و کارکنان اداره ژئوفیزیک مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران که داده‌ها و امکانات لازم برای انجام این پژوهش را فراهم نموده و همچنین اداره پژوهش و توسعه شرکت ملی نفت ایران که حمایت مالی این پژوهش را برعهده داشته‌اند سپاسگزاری می‌نمائیم.

منابع

حسینی شعار، ب.، ۱۳۸۷، شناسایی محدوده‌های رسوبات هیدرات‌های گازی در دریای عمان و بررسی لرزه‌ای آنها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Badley, M.E., 1985, Practical seismic interpretation: International Human Resource Development.

Chopra, S., and Marfurt, K.J., 2007, Seismic attribute for prospect identification and reservoir characterization: SEG Geophysical Development Series.

Cordon, I., Dvorkin, J., and Mavko, G., 2006, Seismic reflections of gas hydrate from perturbational forward modeling: Geophysics, **71**, F165-F171.

Dai, J., Xu, H., Snyder, F., and Dutta, N., 2004, Detection and estimation of gas hydrate using rock physics and seismic inversion; Example from northern deepwater Gulf of Mexico: The Leading Edge, **23**, 61-66.

Davy, H., 1811, On a combination of oxymuriatic gas and oxygen gas:

Max, M.D., Johnson, A.H., and Dillon, W.P., 2006, Economic geology of natural gas hydrate: Springer, Dordrecht.

Rajput, S., Rao, P.P., and Thakur, N.K., 2005, Amplitude strength of simulating reflectors by full waveform modeling: SEG Expanded Abstracts, **24**, 1787-1790.

Robert, H.H., Wiseman, W.J., Hooper, J.J., and Humphry, G.D., 1999, Surficial gas hydrate of the Louisiana continental slope, Initial results of direct observation and in situ data collection: Proceeding of the Offshore Technology Conference, OTC10770.

Ruppel, C., 2007, Tapping methane hydrates for unconventional natural gas: Elements, **3** (3), 193-199.

Shipley, T.H., and Didyk, B.M., 1982, Occurrence of methane hydrates offshore southern Mexico, in Watkins, J.S., and Moore, J.C., eds.: Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, **66**, 547-555.

Sinha, B., Satyavani, N., and Thakur, N. K., 2004, Analysis of interval velocity vs amplitude blanking in a gas hydrate province: Current Science, **87**, 1605-1607.

Sloan, E.D., 1998, Clathrate hydrate of natural gases: Marcel Dekker, Inc.

Stoll, R.D., Ewing, J.I., and Bryan, G.M., 1971, Anomalous wave velocities in sediments containing gas hydrates: Journal Geophys. Res, **76**, 2090-2094.

Trehu, A.M., Ruppel, C., Holland, M., Dickens, G.R., Torres, M.E., Collett, T.S., Goldberg, D., Riedel, M., and Schultheiss, P., 2006, Gas hydrates in marine sediments: Oceanography, **19**, 124-143.

Vohat, P., Sain, K., and Thakur, N.K., 2003, Heat flow and geothermal gradient from a bottom simulating reflector, A case study: Current Science, **85**, 1263-1265.

White, R.S., 1979, Gas hydrate layers trapping free gas in the Gulf of Oman: Earth and Planetary Science Letter, **42**, 114-120.

Yuan, T., Spence, G.D., Hyndman, R.D., Minshull, T.A., and Singh, S.C., 1999, Seismic velocity studies of a gas hydrate bottom simulating reflector on the northern Cascadian continental margin; amplitude modeling and full waveform inversion: J. Geophys. Res., **101**, 1179–1191.

Philosophical Transactions of the Royal Society, 155 pp.

Ecker, C., 1997, Characterization of a hydrate reservoir: Stanford Exploration Project Report, **94**, 1-16.

Grevemeyer, I., Villingers, H., and Rosenbergers, A., 2000, Natural gas hydrates on the continental slope off Pakistan, constraints from seismic techniques: Geophysical Journal International, **140**, 9 pp.

Hammerschmidt, E.G., 1934, Formation of gas hydrates in natural gas transmission lines: Industrial and Engineering Chemistry, **26**, 851 pp.

Hardage, B.A., Murray, P., Sava, D., Backus, M.M., Remington, R., Graebner, R., and Roberts, H.H., 2006, Evaluation of deepwater gas-hydrate systems: The Leading Edge, **25**, 572-576.

Hardage, B.A., and Roberts, H.H., 2006, Gas hydrate in the Gulf of Mexico; What and where is the seismic target?: The Leading Edge, **25**, 566-571.

Hyndman, R.D., Currie, C.A., and Mazzotti, S.P., 2005, Subduction zone backarcs, mobile belts, and orogenic heat: GSA Today, **15**(2), 4-10.

Kumar, D., Sen, M.K., and Bangs, N.L., 2006, Seismic characteristics of gas hydrates at Hydrate Ridge, offshore Oregon: The Leading Edge, **25**, 610-614.

Kvenvolden, K.A., 1993, A primer on gas hydrate; The future of energy gases: U. S. Geol, Survey Professional Paper, **1570**, 279-291.

Kvenvolden, K.A., 1995, A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate: Org. of Geochem., **23**, 997-1000.

Kvenvolden, K.A., 1998, A primer on the geological occurrence of gas hydrate: Geological Society Special Publications, **137**, 9-30.

Makogon, Y.F., Trebin, F.A., Trofimuk, A.A., Tsarev, V.P., and Cherskii, N., 1971, Detection of A Pool of Natural Gas in a Solid (Hydrated Gas) State: Doklady Akademii Nauk SSSR, **196**, 203-206.